

риалами ABS It. Реагировать и эффективно улучшать совместимость поверхности раздела в переработанном ABS-бетоне.

По показателю прочности на разрыв 28d переработанных ABS-пластиков с различными пропорциями концентрации раствора SCA можно видеть, что прочность на сжатие является наибольшей при концентрации 1 %, что на 120 % выше, чем у испытательного блока, содержащего раствор SCA увеличивается, а прочность немного снижается и, наконец, держится на уровне 5,03 МПа. Это связано с тем, что с развитием реакции гидратации цемента силановое связующее образует больше связей в бетоне из ABS-пластика, то есть связывающая способность пластика ABS и цементного раствора постепенно увеличивается.

#### **Заключение**

1. Когда толщина ABS-пластика составляет 0,4 мм, внешний вид поверхности после шлифовки может вызвать зазор шириной 3 мм и глубиной 0,7 мм, что значительно улучшает совместимость с бетоном, а также улучшает механические свойства на физическом уровне.

2. С увеличением концентрации SCA прочность на сжатие и прочность на растяжение вторичного ABS-пластика сначала увеличивается, а затем становится стабильной, и наилучшая концентрация составляет 1,0 %.

3. 1,0 % раствор SCA может эффективно улучшить интерфейсную совместимость материалов ABS в переработанном ABS-пластиковом бетоне, уменьшить межфазные пустоты и трещины, повысить плотность бетона, снизить коэффициент миграции хлорид-ионов в переработанном ABS-пластике в бетоне и улучшить композит ABS-бетон. Большее влияние оказывает коррозионная способность ионов хлора.

УДК 621.9.011:517.962.1

#### **МКЭ-АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ БАШНИ АЗИНЕЛЛИ В БОЛОНЬЕ**

*Довнар С. С., Ланука А. Д., Дулуб А. Д., Кустов С. В.  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail: stanislaw.dovnar@gmail.com*

***Summary.** FEA of a load-bearing system for well-known Asinelli's tower is provided. Three-layer model "outer brick – filling – inner brick" is developed for historic tower walls. Frictional contact pair is created between the tower itself and the basement. Static simulation of gravity and hurricane loading is fulfilled. Stress state harmonization between outer and inner brick shells is revealed. Equal compression stress margins for bricks and filler are discovered. Hurricane wind isn't able to produce tension stress in any part of the tower. So crack propagation is suppressed.*

Башня Азинелли является единственной полностью сохранившейся средневековой (XII век) башней Болоньи (рис. 1). Этот кирпиче-бетонный объект широко известен, многократно исследовался и хорошо описан. Башня, единственная из 100 подобных сооружений, выдержала многочисленные ветровые воздействия, землетрясения, осадку фундамента. Следовательно, ее несущая система (НС) интуитивно создана удачной. Конструкция башни является субтильной – высота равна 97,2 м при сторонах сечения по низу ~8 м. Требуется понять причины прочности НС. В данной работе для этого используют МКЭ-анализ. Постановка моделирования на текущем этапе – статическая.

В башне взаимодействуют два конструктивных решения – утолщение стен к низу внутрь башни и трехслойная конструкция каждой стены (рис. 1 а, з). Только верхняя треть в башне является цельной кирпичной кладкой (КК). Ниже из кирпича выполнены наружный (КК1) и внутренний (КК2) слои (оболочки) стены. Между оболочками находится бетонообразный наполнитель (stuccato), который будем обозначать как бетон Б1. КК1 и КК2 в масштабах башни показаны по-отдельности на рис. 2, а, б соответственно.

Башня опирается на основание из селенита С (рис. 1, *а*). Под ним находится параллелепипед фундамента из бетона Б2. Ниже стоит массив дубовых свай Д. Вокруг Б2 и Д моделировался грунт. Все материалы полагаются изотропными и линейно-упругими.

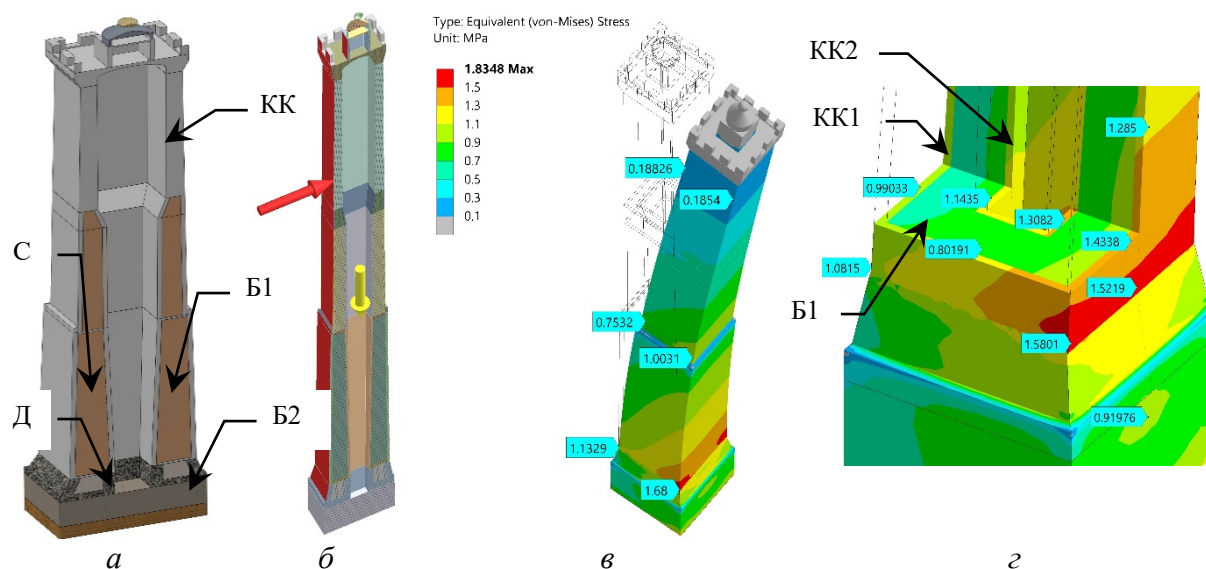


Рисунок 1 – Модель башни Азинелли: *а* – система солидов (модель условно сжата по высоте в 3,4 раза); *б* – прилагаемые нагрузки (модель в сечении); *в* – картина эквивалентных напряжений (МПа;  $\times 200$ ); *г* – эквивалентные напряжения внутри стен башни на сопряжении с селенитовым основанием ( $\times 200$ )

Главным статическим вариантом нагружения башни было сочетание (рис. 1, *б*) собственного веса (вертикальная стрелка) и ветровой нагрузки (горизонтальная стрелка) в виде давления 600 кПа. Это ураганный напор. Он прилагался только к одной стене башни и принимался одинаковым по всей высоте.

Картина эквивалентных напряжений и форма изгиба башни показаны на рис. 1, *в*. Распределение минимального главного напряжения, ответственного за сжатие, является практически таким же. Напряжения по причине гравитации возрастают при движении от верха к фундаменту башни. С подветренной стороны напряжения выше («0.1854 – 1.0031 – 1.68» МПа). Здесь сочетаются сжатия от собственного веса и от изгиба ветром. Однако, максимальное напряжение 1,68 МПа достаточно далеко до опасного уровня ( $> 10$  МПа).

С наветренной стороны напряжения ниже («0.18826 – 0.7532 – 1.1329» МПа). Тем не менее, они остаются сжимающими даже при вертикальной разгрузке стены ураганным ветром. Кирпичная кладка не попадает под действие растяжения и не растрескивается.

Наполнитель Б1 имеет меньший модуль упругости, чем кирпичные массивы КК1 и КК2 (3 и 4 ГПа соответственно). Поэтому он сжат слабее (рис. 1, *г* – маркер «0.80191») кирпичей (парные маркеры «1.1435» и «1.3082»). С учетом допустимых напряжений это примерно обеспечивает равнопрочность трехслойной стены по сжатию.

На рис. 2 отражено центральное осевое сжатие башни под действием только силы тяжести. Сравнение рис. 2, *а* и рис. 2, *б* показывает, напряжения во обеих кирпичной кладках практически одинаковы для данной высоты. Равномерность нагружения оболочек обеспечена.

Рис. 2, *в* демонстрирует, что на интерфейсе между башней и основанием есть лишь умеренная концентрация сжимающих напряжений (маркер «1.544» МПа). Этот стык моделируется в МКЭ-анализе как фрикционная контактная пара, что повышает достоверность расчетов. Открытие контактов отсутствует. Под действием ураганного ветра проскальзывание оказывается локальным и не превышает 0,42 мм.

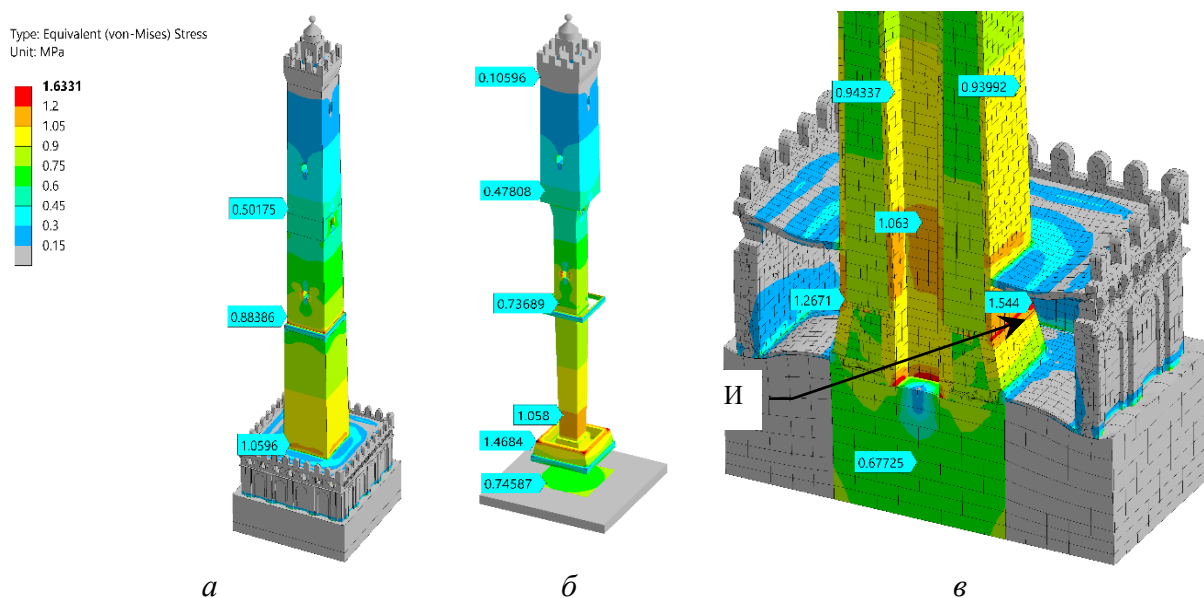


Рисунок 2 – Распределения эквивалентных напряжений (МПа) в наружной (а; КК1) и внутренней (б; КК2) кирпичной кладках, а также в вертикальном разрезе полной модели (в) при нагружении только собственным весом ( $\times 700$ )

В конструкции башни подбор размеров обеспечил одинаковую напряженность внешней и внутренней кирпичных оболочек. Напряжение в кирпиче зависит только его положения по высоте. Концентрация напряжений в углах башни отсутствует. Механические свойства КК1, КК2 и Б1 гармонизованы друг с другом. Наполнитель нагружен слабее кирпича, но только в 1,5 раза. Это разумное распределение силы тяжести.

В башне присутствуют линейные концентраторы напряжения, например, по верхнему торцу основания С. Однако, во-первых, они являются сжимающими и умеренно опасными в смысле трещин. Во-вторых, коэффициент концентрации не превышает в пределах каждого сечения 22 %. Сочетание всех перечисленных причин, по-видимому, обеспечило статическую прочность и долговечность НС башни.

УДК 625.71

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕФТЕШЛАМА ПРИ УСТРОЙСТВЕ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Жуковский Е. М., Добрынович Я. А.

Белорусский национальный технический университет

e-mail: zhukovskye@gmail.com

**Summary.** The article discusses the possibility of using oil sludge in the construction of structural layers of road pavements. A technique for determining the optimal content of oil sludge in the mixture is considered. Technologies for the use of oil sludge in road construction are proposed, as well as their advantages and disadvantages are considered.

В Республике Беларусь при устройстве оснований из асфальтогранулята для достижения его оптимальной влажности используется вода. Однако такой способ устройства оснований не может быть признан рациональным, поскольку не в полной мере используются свойства асфальтогранулята как материала, содержащего органическое вяжущее. Для устройства слоев основания предлагается использовать нефтяной шлам. Нефтяные шламы из-за своего химического состава «омолаживают» битум и вызывают его временное размягчение в результате чего уплотненный с нефтяным шламом ас-